

融雪流出への情報理論的アプローチ

金沢大学工学部	正 員 高瀬信忠
大阪府土木部	正 員 野村継男
石川工専	〇 正 員 畑 時男

1. はじめに

日本海側とくに北日本において冬季間にみられる降雪という自然現象は従来はとすれば災害という面からとらえられることが多かった。しかし、水資源としての需要量の増加あるいはその利用形態が複雑化して来ている今日では、降雨時の異常流出という問題を除けば、その流出形態は比較的滑らかであり、安定性に富むことなど水資源として質的にも量的にも優れた性格を有している。すなわち融雪流出は積雪という形で流域という一大貯水池に貯留され、熱エネルギーによってその流出を制御されるダム内の水のごとくである。ところでこのような融雪水を水資源として利用するには長期間的視野に立った計画的取水・配分が必要であり、その長期間の変動特性を適確に把握し、長期間流出機構を解明する必要がある。しかしこのようなアプローチは低水流出的解析、貯水効果の影響などその取り扱いが困難となる。しかしながら融雪流出はその供給源が流域内の積雪層であり、融雪期間中は1日を周期とした安定した流出が期待される。それ故、短期間の流出機構が把握されれば、融雪水を流域内の貯水池に貯留し、かつ融雪流出の特性を考慮した水門操作を行えば水資源の計画的配分・利用が可能と考えられる。このような観点のもとに、流出現象の不確定性を考慮した石原・高樟らの長期間流出モデルを短期間の融雪流出に適用し、入出力の相関より融雪流出の特性の把握に努めた。

2. 融雪流出への情報理論モデルの適用

流出現象、特に長期間流出の持つ不確性を考慮した確率・統計論的な手法、情報理論の概念を導入した解析法が内外に多くみられ、わが国においても石原・高樟らの研究、日野の研究がある。このうち石原・高樟らは流出現象の水理学的意義について考慮を払いつつ、Wienerの濾波予測理論の概念を導入した長期間流出の応答モデルを提案した¹⁾。このモデルを流出現象に適用するには次の仮定を満たす必要がある。

- 1) 入力系列は統計的に定常である。
- 2) 流出系は線型かつ物理的に定常である。

石原・高樟らの統計的単位関はWiener-Hopfの積分方程式を解いて得られるが、流出現象であることを考慮して次式のように離散形で表わした。

$$\Phi_{12}(\tau) = \sum_{k=1}^m h(k) \cdot \Phi_{11}(\tau) \quad (1)$$

ここで m は降水の流出に影響する時間、 $h(k)$ は統計的単位関(最適応答関数)である。また $\Phi_{11}(\tau)$ 、 $\Phi_{12}(\tau)$ はそれぞれ入力(降水)系列の自己相関関数、入力系列と出力(流量系列)の相互相関関数であり、次式で定義される。

$$\Phi_{11}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} f(i) \cdot f(i+\tau) \quad (2)$$

$$\Phi_{12}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} f(i) \cdot g(i+\tau) \quad (3)$$

上式において $f(i)$, $g(i)$ はそれぞれ入力および出力であり, N は対象時間である。

この情報理論モデルを1サイクルないし数サイクルの短期間の融雪流出に適用するには前述の仮定の適合性について検討する必要がある。まず入力系列の定常性について考えてみよう。融雪流出においては、融雪を生じさせる入力として熱エネルギー指標としての気温が用いられるのが一般である。一般に気温は定常確率過程であり、融雪期間内において考えれば時間気温系列は定常確率過程から抽出された定常時系列であると考えられるであろう。また流出系の線型性については従来の単位関法で受け入れられている仮定である。すなわち出力としての河川流量は熱エネルギーによって積雪層表面で融雪が生じ、それによる融雪水は積雪層内を浸透流下し、一部はさらに地層表面より下層へと浸透し地下水面へ達し河道へ流出する。この運動過程において支配的な物理法則はダルシー則であると考えられるから、流出系の線型仮定は成立するであろう。また流出系の定常性については融雪および流出の生起場が雪線の後退に見られるように時間的、場所的に変動することおよび積雪層自体において融雪の進行とともに密度・含水比等の変化あるいは構造・組織の変化などを考えるとその定常性は必ずしもいえない。しかし雪線の後退は比較的緩慢であり、また短期間の流出を考えれば巨視的には定常性がいえるであろう。

3. 実際河川への適用

上述のように、入出力系列の定常性、流出系の線型・定常性が仮定できたので、Wiener の濾波・予測の理論に立脚した長期間流出モデルを実際河川の融雪流出に適用してみた。解析対象流域として手取川水系尾赤川流域(流域面積は187.0 Km²であり、解析対象点と流域最高点の比高は2,100 m、面積高度曲線の直線近似で便宜上1,600 m)を選んだ。

この適用にあたって入力として気温を融雪の場所的・時間的変動を考慮して三次元の熱エネルギー指標に変換した積算体積気温 S_T を使用し、出力としての融雪流量はハイドログラフの波形を考慮して図-1のように対象期間前のハイドログラフの減水曲線を延長し、その延長した減水曲線とハイドログラフの縦距の差を融雪流量の Q_s とした。

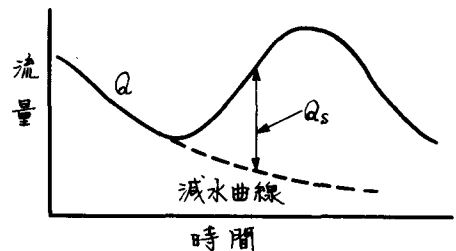


図-1 Q_s の分離

i) S_T の自己相関

図-2は昭和38年5月12日の S_T のコレログラムである。自己相関係数 $r_{11}(\tau)$ は次式によって定義される。

$$r_{11}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} f(i) \cdot f(i+\tau) / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i)^2 \quad (4)$$

図-2のコレログラムは $N=24$ 、すなわち対象時間を24時間として得られたものである。図-2に注目してみると、自己相関係数 $r_{11}(\tau)$ の逓減は非常に緩やかであり、コレログラムの基本型のうち

の第一種の持続性を有している。これは初期の熱エネルギー $r_{11}(\tau)$

ギーによって上昇した気温が以後の時点における気温に影響を与えるという気温のもつマルコフ性によるものであろう。また異なる年度・期間において得られるコレログラム相互においてはその値に大きな差異は見られず、時間気温は定常時系列であるという一端がうかがえる。

ii) $S_T - Q_S$ の相互相関

流出系は時間遅れ系であるから、融雪流出の場合、 S_T はある時間だけ遅れて流量に変換されて流出して来る。このような遅れを統計的に算定するには入出力の相互相関数 Φ_{12} が最大になるような τ を求めれば良い。このような τ を τ_m とすると、 τ_m は流出系の代表的な遅れ時間を与える。図-3 は式(3)において $N=48$ として得られた昭和38年5月12～13日の相互相関関数であり、図-4 は S_T と Q_S の対応図である。当然 S_T と Q_S も共に24時間を周期とする波動であり、また Φ_{12} も若干異なるが24時間を周期として極大値を持っている。図-4 の S_T と Q_S の対応図から気温のピークと流量のピークのずれ、すなわちピーク流量の遅れの時間 t_g は5月12、13日の両日に対して6時間が得られる。一方図-3からは τ_m はそれぞれ、9hr, 8hr が得られる。このように t_g と τ_m の間には2～3hrの差が見られるが、 t_g と τ_m の性格からいって当然であらう。すなわち t_g は特定の入力に対する流量の遅れ時間であるのに対し、 τ_m は入出力の全系列を対象とした時の流出系の遅れ時間であることによる。

また τ_m は12日と13日とでは1hrの差が生じており、 τ_m が系の定常性を示す重要な指標であることを考え合わせると融雪流出系の定常性に疑念が生じ、何らかの修正の必要があることを示唆してくれるものである。

iii) 最適応答関数

最適応答関数すなわち統計的単位関数 $h(\tau)$ は Wiener-

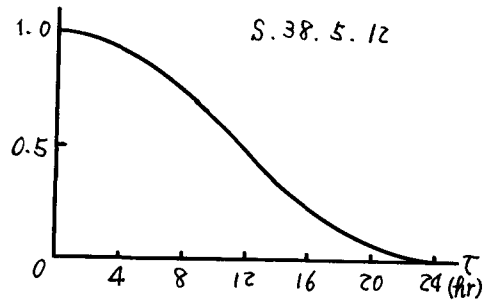


図-2 S_T の自己相関係数

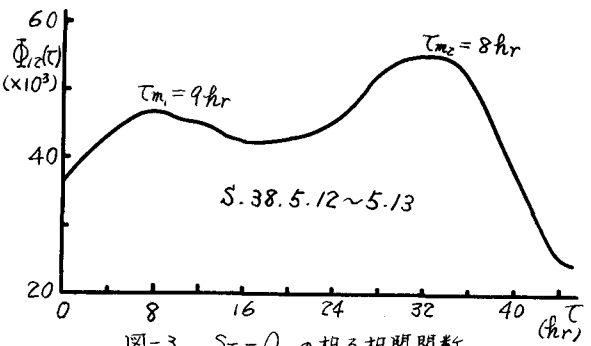


図-3 $S_T - Q_S$ の相互相関関数



図-4 S_T と Q_S の対応

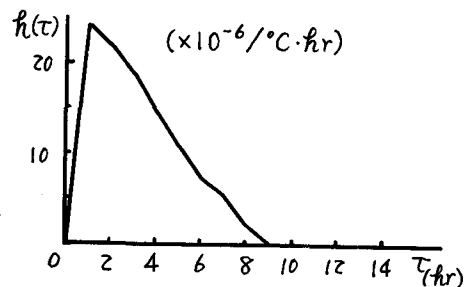


図-5 最適応答関数

Hopfの積分方程式を離散的に表現した式(1)を解いて得られる。図-5は昭和41年5月12日の資料をもとに得られた最適応答関数である。これを見ると短期間の融雪流出の最適応答関数は簡単な三角形で表わされている。この結果は基底長およびピーク流量の遅れの時間が従来の解析結果及び $S_r - Q_s$ の相互相関関数 Φ_{12} より得られる T_m と比較すると小さすぎるようである。ところでこの単位図を他の期間に適用するため次のような操作を行なった。すなわち一連の解析に見られる体積気温定数(融雪流出量 ΣQ_s と積算体積気温 S_r の比、 $\Sigma Q_s / S_r$) C に代表されるような流出系の差異を最適応答関数に組み入れた。すなわち最適応答関数 $h(t)$ を求めた日の資料の体積気温定数 C_0 とし、これを体積気温定数 C' になる日に適用するとすれば、この時の最適応答関数 $h'(t)$ を次式のように修正しやればよい。

$$h'(t) = h(t) \times \frac{C'}{C_0} \quad (5)$$

図-6, 図-7は式(5)によって修正された単位図を適用した例である。これによるとピーク流量はどの大きさにおいて大体よい一致をみせている。しかし計算流量と実測流量の間には多少の遅れがみられる。これは前述のように最適応答関数の遅れの時間が小さすぎることに起因するとともに式(5)の修正では不十分であることを示している。

4. むすび

情報理論の概念を導入した石原・高柳らの長期間流出モデルを1サイクルないし数サイクルの短期間の融雪流出に適用してみた。この結果より適用仮定である入力系列の定常性、流出系の線型・定常性のうち、後者については融雪流出系の場合はさらに検討の必要があることがわかった。また最適応答関数を使用して得られる計算ハイドログラフと実測ハイドログラフとの間には多少の差異が見られた。とくに時間のずれが大きかった。これは融雪の進行とともに雪線の後退、あるいは雪質の変化などによる流出系の変化によるものであろう。このように融雪流出系へ統計的単位図法を適用するには2つの仮定を十分考慮したなんらかの操作を必要とするであろう。

参考文献

- 1) 石原藤次郎・高柳琢馬・池淵周一：長期間流出機構に関する2, 3の考察, 土木学会論文報告集第196号, 昭和46年
- 2) 高瀬信忠・野村継男：融雪出水に関する研究, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, 土木学会 昭和46年

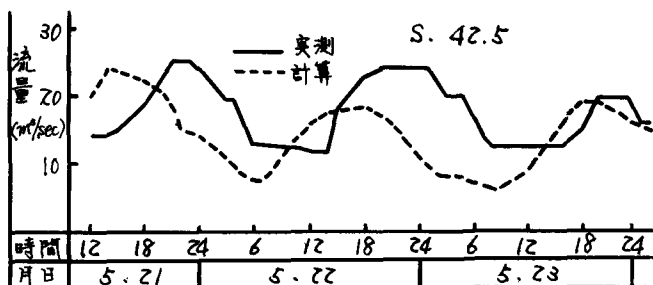


図-6 実測流量と計算流量の比較

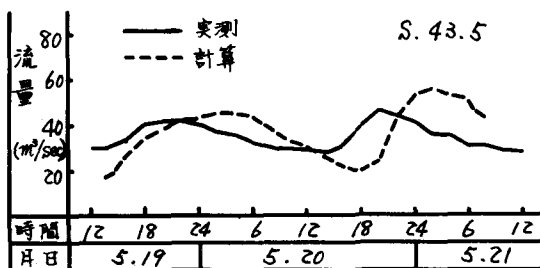


図-7 実測流量と計算流量の比較